

太陽系の指導に関するシミュレーションについて

—太陽、月および地球の運動を中心に—

下 村 忠 行

1. はじめに

天空に見える太陽、月、星など諸天体の運動を通して太陽系モデルを導入し、太陽系についての認識を深めさせることは、小学校、中学校における理科教育の大きな柱のひとつである。しかし、地球は太陽を中心に公転しており、さらに地球自身も自転しているので、日常の観察や経験から太陽系モデルを指導することは、容易ではない。そこで、太陽と月および地球の運動を中心に、太陽系モデルを把握していくのに基本的と考えられる事項について検討し、それらの理解を援助するためのコンピュータによるシミュレーション教材を作成したので、その概要を報告する。

なお、このシミュレーションは小中学生が直接利用するためのものではなく、指導者の理解をより確かなものにすることを目指したものである。

2. 太陽、月および地球の運動の指導

(1) 小学校、中学校における太陽と月の運動の指導

現行の学習指導要領の小学校理科および中学校理科における太陽系に関する指導内容は、およそ次のようになっている。

[小学校]

小学校理科では、指導内容を「生物とその環境」、「物質とエネルギー」、「地球と宇宙」の3つに区分し、「地球と宇宙」において天文関連の事項を扱っている。

第3学年：太陽の位置と日陰の関係を調べることができるようにする。具体的には、

- ・日陰の位置は、太陽の動きによって変わることを。

第5学年：太陽と月の形や位置などの観察から、太陽や月の動きと位置関係を調べることができるようにする。具体的には、

- ・太陽や月は東の方から出て南の空を通り、西の方に入ること。
- ・月は日によって形が変わって見え、月の輝いている側に太陽があること。

第6学年：恒星の明るさ、色、位置などの観察から、星の特徴や動きのきまりを調べることができるようにする。(惑星は扱わない。)

[中学校]

中学校においては、天文関係の内容は第2分野「地球と太陽」において扱っている。「地球と太陽」では、身近な天体の観察を通して地球の運動について考察し、月、太陽および地球の特徴を理解し、太陽系についての認識や時間、空間についての認識を深めることを目標としている。具体的には、

- ・天体の日周運動が、地球の自転による相対的な運動であることを把握させること。
- ・季節による星座の位置の変化や、昼夜の長さや太陽高度の年周変化などの観察結果を、地球の公転や地軸の傾きと関連させて把握させること。
- ・惑星の観察資料から、惑星の位置関係や太陽系の構造および空間的広がりをとらえさせること。

などである。

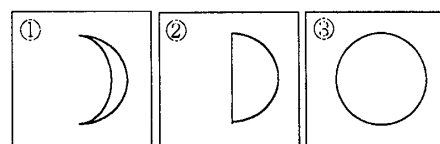
また、指導にあたっては小学校との関連を重視し、透明半球などによる太陽の日周運動の測定や、天球儀や地球儀を用いてのモデル実験などによる考察も行わせるようにしている。

(2) 小学校におけるドリルの例

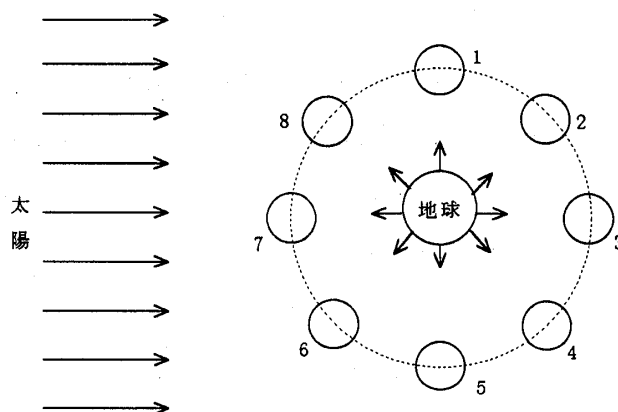
小学校においては、実際にどの程度の内容を扱っているかをみるために、小学校5年「月と太陽」における練習問題例を2つ示す。なお、これらの問題は内容のみを示し、形式は変えてある。

[例1] 夕方見える三日月、半月、満月で、次の文は右図 ①、②、③ のどの月ですか。

- (ア) 南の空に見える。
 (イ) これから南の方へ高くなっていく。
 (ウ) これから西の方へ低くなっていく。



[例2] 地球から見て月が1～8にあるとき、月はどうのような形に見えますか。



これらの練習問題からもわかるように、小学校5年においてかなり高度な問題を扱っている。月の上弦、下弦を考える場合などは地動説によって理解することになると思われるし、また、例2の問題の図は地球のまわりを回る月の公転を表すもので、関連する書物によく見られるのであるが、なかなか理解しにくいもののひとつである。この図自体が、太陽系のモデルが既にできあがったのもののような感じがする。

(3) モデルによる指導について

上述のように、小学校、中学校における天文関係の内容は、日常における天文現象の観察や関連資料による考察、モデル実験などを通して、太陽系や時間、空間について理解を深め、さらに広大な宇宙への関心を高めていく内容になっている。

ところで、日常生活において太陽や月、星など天体の運動を観察すると、“我々が存在する地面を中心に諸天体が回っている”と考える、いわゆる天動説が自然である。これはアリストテレスからコペルニクス、ガリレオの時代に至るまで、一千数百年も続いてきた考え方であり、そこに宗教的な理由などもあったにせよ、きわめて自然な考え方であることは確かである。このような日常経験を太陽中心の太陽系モデルへ導くには、それなりのステップが必要なはずであるが、日常の様々なメディアから得られる知識などによって、漠然とではあるが太陽系のモデルが、学年を追って知識として定着しているのが現実である。天文関係の指導に際しては、このような学習者の状況をふまえて臨む必要がある。

中学校理科の学習指導要領においては、太陽、地球、月などの運動の指導において、天球儀や地球儀などモデルを導入しての指導に触れている。太陽を中心とした太陽系のモデルに関しては、目的に応じて様々なものが考えられようが、モデルを導入する過程において、単にモデルの機械的な運動の観察のみに終始するのでは意味がない。ふだん地上から観察される太陽や月と地球の関係をモデルとして把握し、予測し、モデルを検証していくことが、とくに大切であると思う。

(4) 太陽系モデルの導入にあたっての基礎的な事項

太陽系モデルを考える場合、地上での観察や体験を中心として広大な宇宙を考えるので、とくに留意しなければならない事項について、太陽と月および地球に関連する内容にしばって考えてみる。

(a) 太陽光線について

つねに、“地上に到達する太陽光は平行光線である”ことに留意する。模型のモデルにせよ、コンピュータによるシミュレーション・モデルにせよ、広大な宇宙空間を表すには限界がある。1億5千万キロメートルものかなたにある太陽から地上や月に降り注ぐ光は、

当然、平行光線とみなすべきであることをつねに念頭においてモデルを見ることが大事である。

(b) 地軸について

地球は地軸を軸にコマのように自転しているから、“地軸の向きは変わらない”ことに留意する。地球は地軸をつねにほぼ北極星の方向に向けて、太陽のまわりを公転している。すなわち、地球は公転面に対して赤道面はつねに23.5度の傾きを保ちながら、公転面を横切って進むのである。(長期的には、地軸は首振り運動をしている。)

(c) 地球と月の公転面について

“太陽のまわりを回る地球の公転軌道、および地球のまわりを回る月の公転軌道は円とみなしてよい”ことに留意する。厳密には楕円軌道であるが、正円との差はきわめて僅かである。

また、“地球の公転面と月の公転面は同一平面内にある”と考える。実際には数度の違いがあるが、できるだけ単純なモデルとして考えるためである。

(d) 月の上弦と下弦について

上弦の月と下弦の月の上弦、下弦は月の見え方(形)を表すのではなく、“月齢で数えてひとつき一月の前半、すなわち新月から満月までの間の半月が上弦であり、ひとつき一月の後半、すなわち満月から新月までの間の半月が下弦である”ことに留意する。

これより、月の公転の向きも理解できる。

基礎的な事項は以上挙げたほかにもいろいろあろうが、これらは生徒に教え込むというものではなく、あくまでも指導者側が留意すべき事柄である。

3. コンピュータによるシミュレーション教材の作成

(1) コンピュータ・シミュレーションについて

コンピュータは理科教育において有力な武器のひとつであるが、利用にあたっては周知な指導計画のもとに、指導内容の一環として扱うように留意しなければならない。当然のことではあるが、単にコンピュータによる演示のみですべておしまいというのでは、全く意味がない。

理科教育におけるコンピュータの利用としては、実験データの処理やシミュレーションなどが考えられる。実験、観察においては、得られたデータの処理を直ちにコンピュータに入力して行うのではなく、データを処理し、グラフ化するなどの過程は手計算でやって体得していく方が、教育的により重要な場合が多い。一通り処理過程を体験してから、条件を変えるなどした他のデータの処理はコンピュータを用いて結果を導くようにするな

ど、きめ細かな配慮が必要である。

コンピュータ・シミュレーションについても同様に、現象の変化を時間を追って眺めるだけでなく、続く結果を予測したり、次々に表示される現象の物理的な意味を考えるなど、探究の過程を踏みながらのシミュレーションとするような工夫が必要だと思う。教育的には、考えるシミュレーション、探究的に進めるシミュレーションであることが望ましい。

(2) 作成したシミュレーションの概要

ここに紹介するコンピュータ・シミュレーションは、太陽系における太陽、月および地球の運動を、地上から見た太陽や月の運動と関連させて理解することを目的としたシミュレーションである。すなわち、ふだん地上から観察される太陽や月の運動と、太陽を中心として公転する地球および地球のまわりを公転する月の動きとをディスプレイの同一画面上に表示し、時間的な変化を観察しながら3者の間の関係を把握、確認し、理解していくとするものである。

シミュレーションは表示時間間隔を1日単位として年周運動を中心に調べるものと、日周運動について考察する1時間単位としたものの2種類が中心である。画面構成や操作方法は両者ともほとんど同じであり、ここでは1日単位のシミュレーションについて説明する。

(a) 画面構成

このシミュレーションの初期画面を、図1に示す。

画面のおよそ左半分をしめる①、②、③のウィンドウが、太陽系において太陽のまわりを公転する地球および地球のまわりを公転する月の運動を表す部分であり、右半分のウィンドウ④の天球において、地上から見た太陽および月の運動を表す。また、地上から見た月の形と月齢を画面上部中央のウィンドウ⑤に表示している。

シミュレーションは、画面右下の時計ボタンをクリックして時間を1日ずつ進めながら、太陽、月および地球の動きや月の満ち欠けの様子を調べていく。なお、観測点の緯度や表示時間間隔、月齢などは、必要に応じて変更することができる。

このシミュレーションで行う主な観察事象としては、

- (ア) 太陽のまわりを公転する地球および地球のまわりを公転する月の1日ごとの位置の変化の様子。
- (イ) 地球の子午面に対して垂直な東側の方から見た(ア)に対応する地球の様子（南中時における太陽の高度変化など）。
- (ウ) 地上から見た(ア)、(イ)に対応する太陽と月の位置。
- (エ) 地上から見た(ア)、(ウ)に対応する月の満ち欠けの様子。

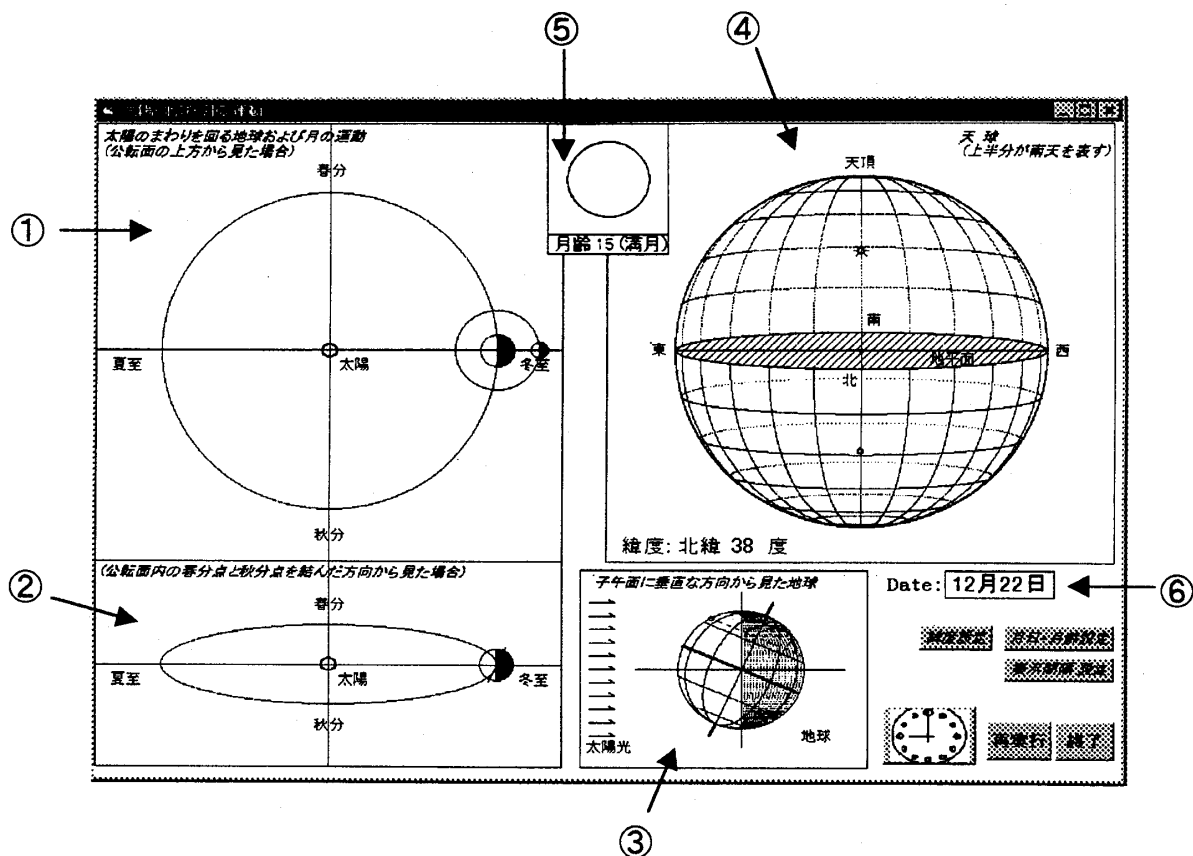


図1 シミュレーションの初期画面

さらに1日間隔の画面表示を1時間間隔の表示に変えることにより、
(a) 太陽や月の日周運動（季節による変化，および緯度による変化）。
などが可能である。

また、このシミュレーションを目標とする探究的な考えるシミュレーションとするため、既に述べたように、時間経過はボタンをマウスで1回クリックするたびに1日経過（日周運動の場合は1時間経過）するようにした。こうすることによって、数個のウィンドウを十分観察し、考察を経てから時間を進めることができる。

なお、自動的に時間を経過させ、天体の動きを連続的に表示するプログラムも用意してある。

(b) 初期設定

シミュレーション開始時の画面を示したで図1でわかるように、初期設定においては、観測地点は北緯38度、日時は冬至（12月22日）の太陽の南中時に、また、月齢は15（満月）としている。この状態から時計ボタンをクリックするごとに、1日（24時間）ずつ時間が進んでいく。

なお、天球ウィンドウの下⑥に表示される月日は、冬至を12月22日として1日ずつ進め

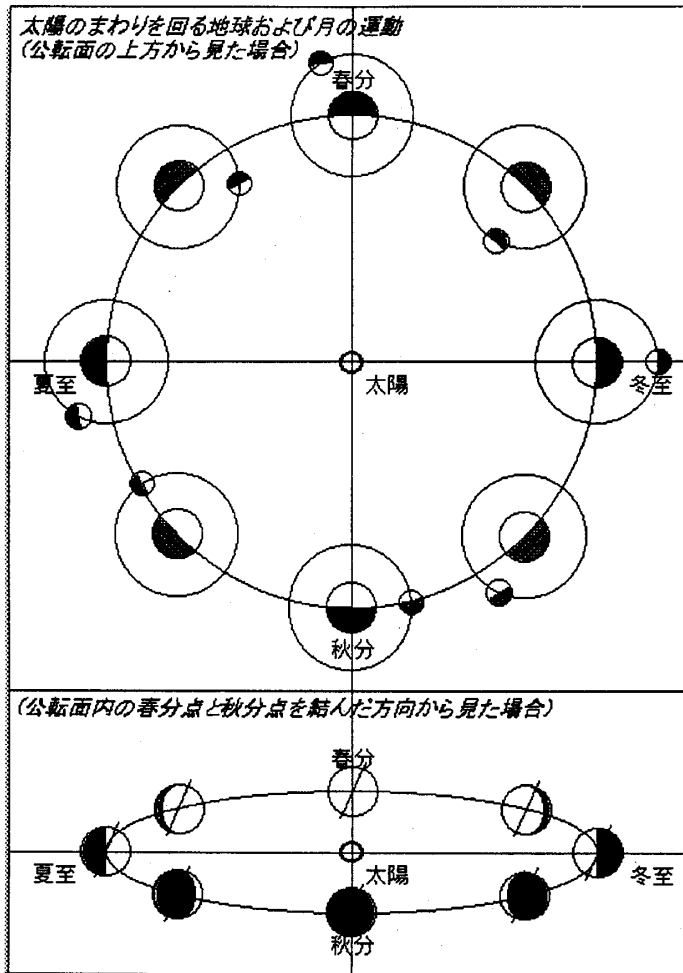


図2 太陽のまわりを回る地球と月の運動
(ウィンドウ①、②)

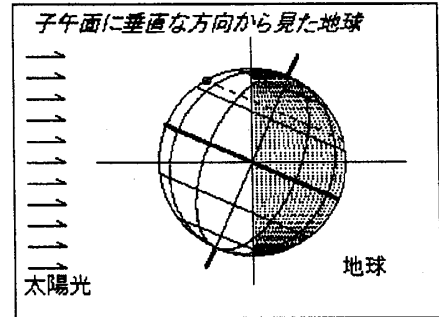


図3 ウィンドウ③の画面例
(子午面に垂直な方向から見た地球)

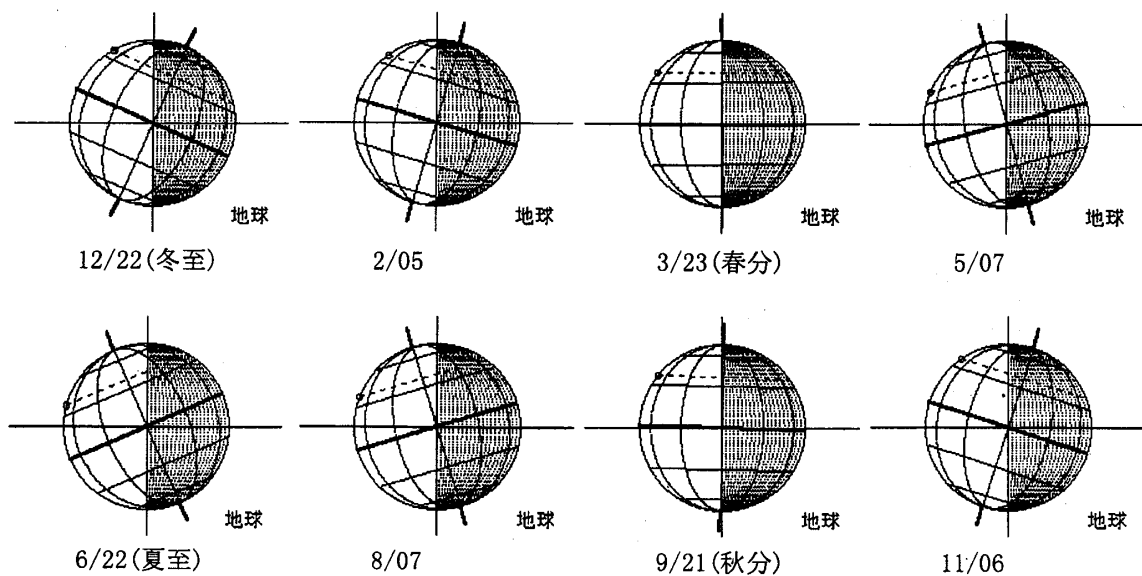


図4 図2に対応するウィンドウ③の画面

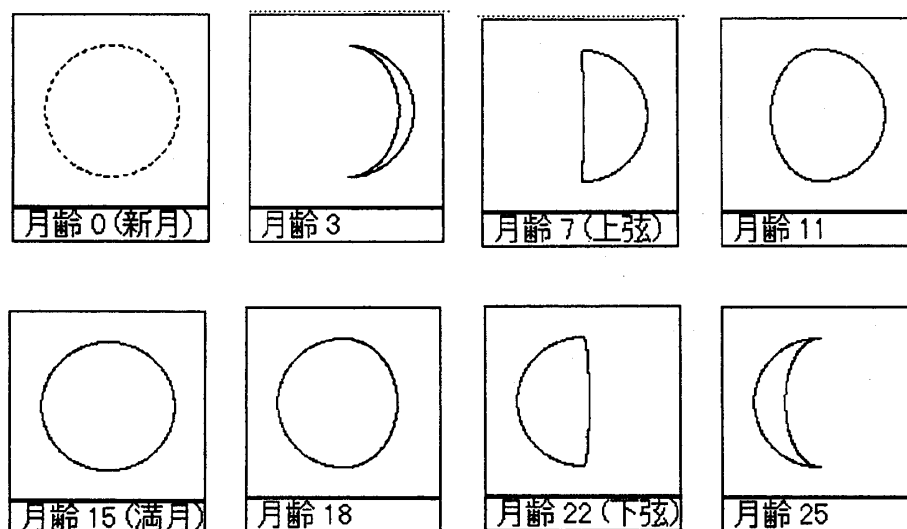


図5 ウィンドウ⑤ 月の満ち欠けの画面例

でのウィンドウ①, ②の様子を45.6日間隔で表示した場合を示す。(実際には, 各表示ごとに前の画面は消えるのであるが, この図では重ねて表示してある。)

また, これに対応するウィンドウ③の様子を図4に示す。

(d) 月の満ち欠け

画面上部中央のウィンドウ⑤は, 地上から見た月の満ち欠けの様子および月齢を示す。月齢は整数で表し, 1日単位で月の形が変わるようにしている。

ここでは, ウィンドウ①における地球から見た太陽と月のなす角と, ウィンドウ④の天球において, 地平面から見た太陽と月の位置関係に注目する。

なお, 月の満ち欠けについては, 月齢の初期値を正しく設定しても1日程度のずれが生じ, 実用にはならない。モデルの不完全さに加え, 月の運動には潮の干満など複雑な要素を含むためである。このことを利用して, モデルの限界などを考えさせる材料にすることもできよう。

ウィンドウ⑤の画面例を, 図5に示す。

(e) 天球

画面右側のウィンドウ④には, 地上の観測者を中心とした天球を表示している。また, ウィンドウの下部左側には観測地点の緯度(北緯)を示している。

図6に示すように, 天球は地平面を見える

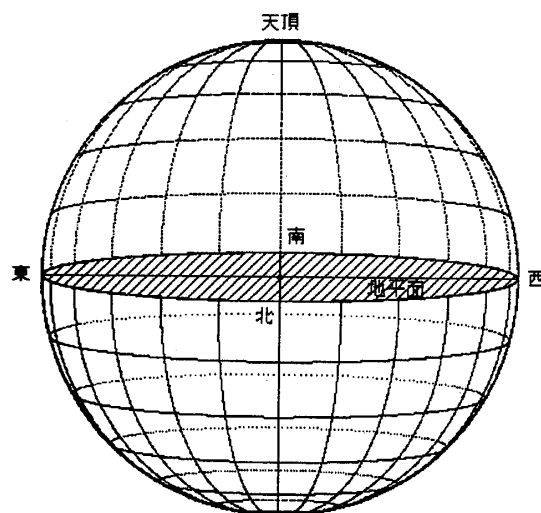


図6 ウィンドウ④天球

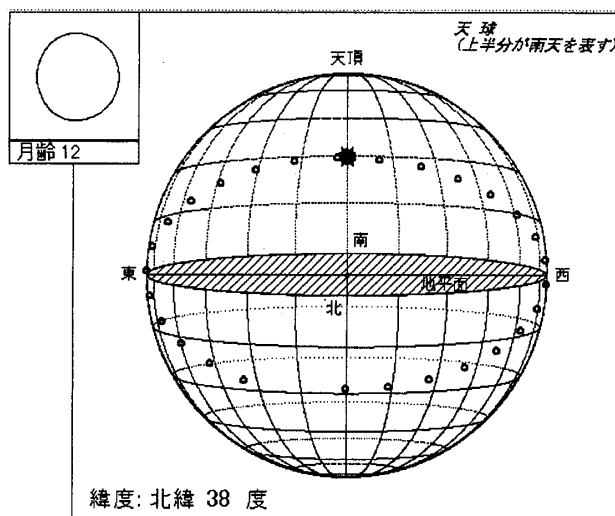


図7 天球上の月の位置と太陽の位置の変化

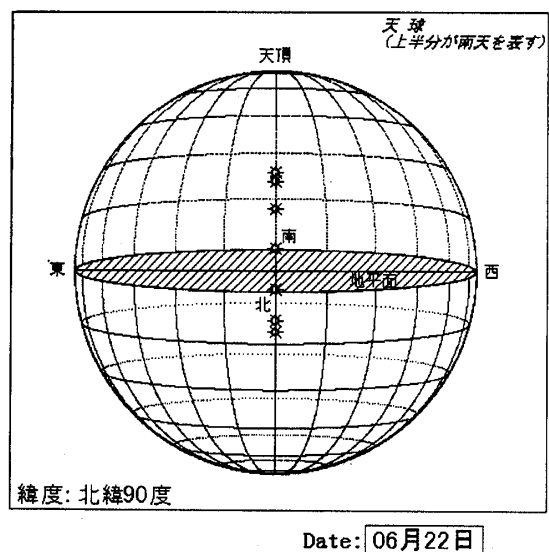


図8 北極における冬至から夏至までの太陽高度の変化

ようにするため、地平面の南北線を手前に6度傾けた状態とし、また、地表面の上部北半分、天球の1/4を取り除き、南天を表示するようにしている。したがって、この天球は南天と、天球外から見た地平面の下部にあたる部分を示す。高度および方位角は15度間隔で描いてある。このシミュレーションの場合は、観測点の南中時における南天と、地平面下の夜の部分を表していることになる。

なお、地平面下の部分は、北側表面をすかして南側の内側も見えるようにしているので、太陽と月の位置を調べる場合は、それがどちら側に位置するのか注意が必要である。

地球の公転面と月の公転面はほとんど同一平面内にあり、地上の観測者から見た太陽と月の位置関係は重要なので、このような方法で天球を表示するようにした。なお、太陽はいわゆるお日様のマークで、月は太線の黒丸で表している。

図7は、冬至（月齢15日、満月）から新月を経て月齢12日までの28日間にわたる1日ごとの天球上の太陽の位置と月の位置とを示したものである。この間に、太陽もわずかであるが高度を増している（図で、太陽は少し伸びて太く表示されている）ことがわかる。

図8は、北緯90度（北極）における冬至から夏至までの南中時における太陽高度の変化を、表示時間間隔30.4日で描いたものである。太陽は高度-23.5度から+23.5度まで変化する。春分においては高度0度、太陽は地平線上にある。なお、この図では、月の位置は表示しないようにしている。

(3) 日周運動のシミュレーション

以上、表示時間間隔1日を標準とし、太陽を回る地球、月の運動と地上での天空の観察との関連を考察しながら、マウスをクリックすることによって時間を進めていくコンピュータ・シミュレーションについて述べた。これは、太陽系における地球と月の運動の理解し、月の満ち欠けや季節による太陽高度の変化などを把握するのに適していると思う。

このシミュレーションに加えて、太陽や月の日周運動についてのシミュレーションも、当然必要である。日周運動のために作成したシミュレーションは、表示時間間隔を1時間としたもので、画面構成はほとんど同じである。

既に説明したシミュレーションとの主な違いは、

- ・表示時間間隔は1時間を標準とし、6時から開始して24時間で終了するようにした。
- また、月の場合は18時から開始するようにした。
- ・太陽と月の1日の軌跡がわかるよう、表示された太陽および月の位置を消さずに残すようにした。
- ・表示月日に加えて、時刻も表示するようにした。

などである。

このシミュレーションの操作方法等は前のものと全く同じなので、ここでは太陽と月の日周運動の実行例をいくつか紹介するにとどめる。

(a) 季節による日周運動の変化

図9に、北緯23.5度（北回帰線上）および北緯38度における夏至の日の太陽の日周運動を示す。北回帰線上では、太陽は南中時に真上を通過する。

また、図10に冬至および夏至の頃における北緯38度地点の月の日周運動を示す。

図10と図9(b)を比べるとわかるように、太陽の高度は夏は高く、冬には低いのに対し、月の高度はその逆で、冬は高く、夏は低い。冬の夜の月が印象的なのは、このことによるのであろう。

(b) 緯度による日周運動の変化

図11に、赤道および北緯38度における春分の日太陽の日周運動を示す。

また、図12に、北極における春分および夏至における太陽の日周運動を示す。

北極では、春分、秋分においては、太陽は地平線に沿って回り、春分から秋分にかけては、地平線下に沈むことはない。

4. おわりに

本報告においては、初等教育における太陽系の指導について考察し、太陽、月および地球の相対的な運動を探究的に調べるために作成したコンピュータ・シミュレーションにつ

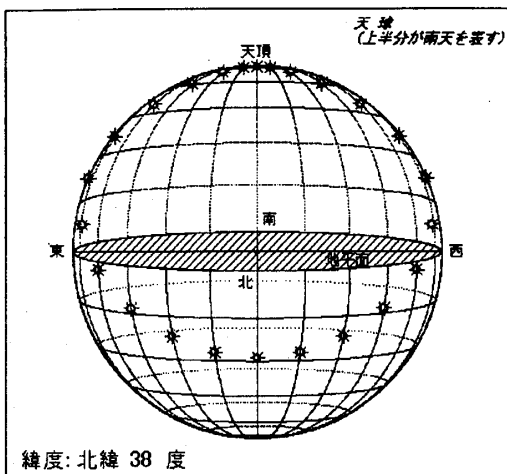
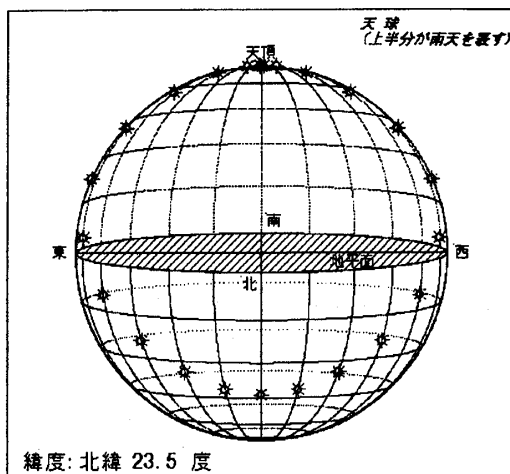


図 9 夏至における太陽の日周運動 (a)赤道上

(b)北緯 38 度

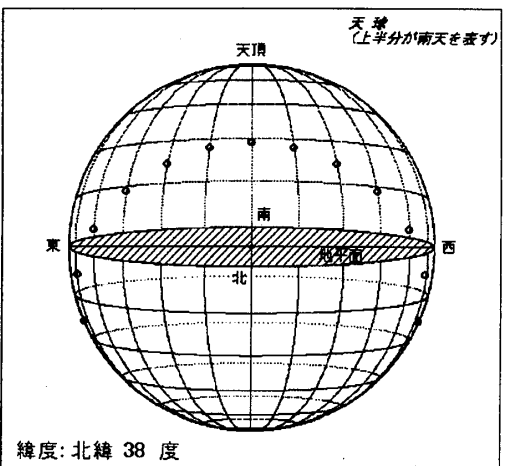
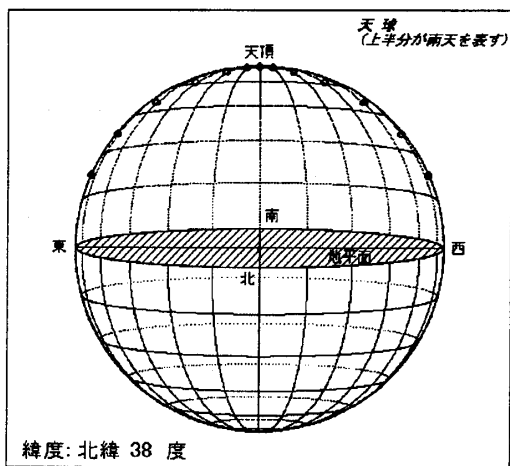


図 10 月の日周運動 (北緯 38 度) (a)冬至の頃

(b)夏至の頃

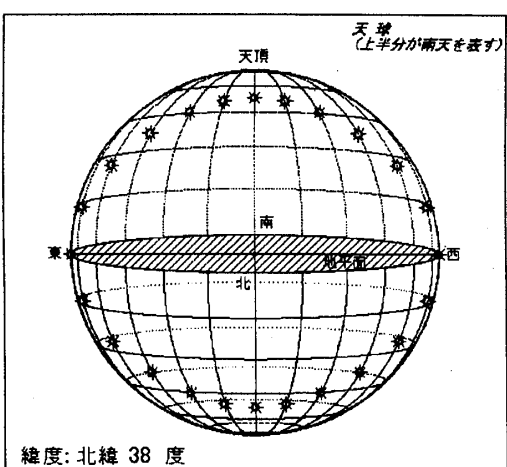
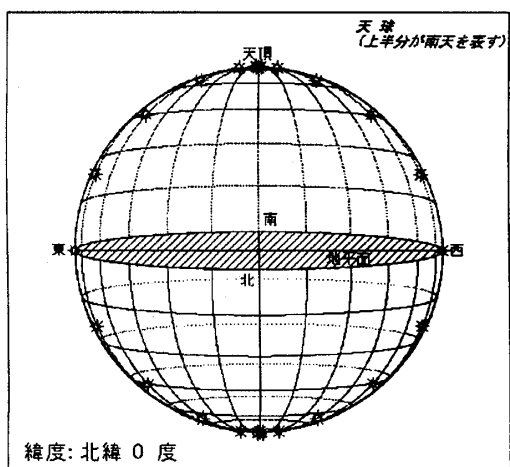


図 11 春分における太陽の日周運動 (a)赤道上

(b)北緯 38 度

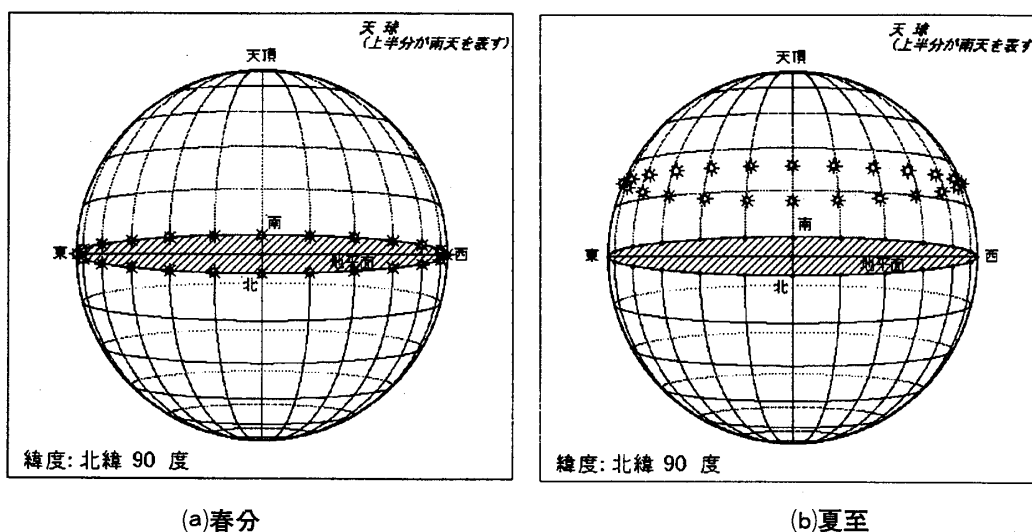


図 12 北極における太陽の日周運動

いて述べた。このシミュレーションの内容はあくまでも指導者または高校生以上を対象にしたものであり、太陽系についての知識、理解を確固たるものにするを目標としている。

地上から観察する天体の運動を通して、広大な宇宙空間における諸天体の相対的な運動をある程度まででも把握していくためには、コンピュータ・シミュレーションの利用は欠かせないであろう。そのシミュレーションを、探究的に思考錯誤しながら進めていくような教育的なものとするのが望まれる。そのためには、現実の現象をそっくりなぞるようなシミュレーションである必要はない。段階に応じてであるが、目的に対して必要最小限の条件を満たした、できるだけ簡単なモデルがよい。そして、得られた結果をもとに、さらにモデルを改良し、発展させていけるようなものでありたいものである。

太陽系のモデルとしては、一歩進めた段階では、例えば地軸の傾きを自由に変えたり、月や惑星の公転面を変化させたりした場合などについて、既知の知識をもとに考察を進め、それを確かめていけるようなシミュレーションを用意するなどの工夫も必要であろう。また、かつて天動説を支えるために提唱された数々のモデルについて、シミュレーションで検討してみることも有意義なことと思う。今後、これらについても、さらに研究していきたい。

なお、このシミュレーションのプログラム作成に使用したソフトは、Microsoft Visual Basic Versio 5.0である。

文 献

- (1) 文部省：「小学校指導書 理科編」，教育出版株式会社（1989）
- (2) 文部省：「中学校指導書 理科編」，学校図書株式会社（1989）
- (3) 国立天文台：「理科年表 平成11年」，丸善株式会社（1998）
- (4) Maurice Ebison: EARLY ASTRONOMY AND PHYSICS EDUCATION, WONDER AND DELIGHT, Institute of Physics Publishing (1994)